

氏 名	田 政
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第245号
学位授与の日付	平成10年3月25日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	電流のモニタリングによるモータ駆動系のパラメータ同定とその応用
論文審査委員	（主査）神谷 好承 （副査）松村 文夫, 佐藤 秀紀, 宮崎 猛, 岩田 佳雄

学位論文要旨

Abstract: Motor systems are mainly acted as the devices which produce driving forces. Besides, it is found by carefully observing the condition of motor system that the motor systems may have an examining function about work conditions. In this case, it is required that parameters of the motor systems can be accurately identified, and the mathematical model established for these motor systems must be correct.

Chapter 2 deals with the identification of parameters related to DC servomotor systems. Generally, it is considered that the parameters of DC servomotor systems can be simply identified by means of the least mean square method. However, because of the mutual effects of Coulomb's friction and the viscous attenuation force, the accuracy with which these parameters are identified depends on the applied input signals.

In chapter 3, using the inertia, viscous attenuation factor and solid friction in a DC servomotor system as identification parameters, the above phenomenon was confirmed, and the identification results were indicated precisely. Finally, an evaluation method of the identification results is discussed by checking the errors of the motor system with mathematical model.

Chapter 4 deals with the mathematical model established for DC motor systems is sometimes ambiguous, or the mathematical model sometimes changes with the change of work conditions. Under these circumstances, the mathematical model established originally is not agree with the actual motor system. So it is impossible to identify the correct parameters. In this part, an example is given as the case that the mathematical model established originally is not correct. Subsequently, the error between the ambiguous mathematical model and current value of the actual motor system is evaluated. Finally, on the basis of the error evaluation, we try to propose the mathematical model with higher precision.

In chapter 5, we have studied a driving method that reduces the reactive force of load by identifying the reactive force of load. By reducing the driving reactive force generated when the motor drives, the system degrades the rapid acceleration and deceleration and, thus, the vibration of the load is decreased. As a result of this driving method, a gentle drive of the mechanical system can be achieved.

1. 緒 論

モータ駆動系は駆動力発生源としてのアクチュエータ機能がその主な機能であると考えられるが、モータ駆動系の運動状況を詳細に観察することにより、動作状態を判断するセンサとしての機能を合わせ持たせられるようにも思われる。

本研究では、モータが駆動する作業機械の信頼性を高めるために、各種の作業において、動力、駆動及び精密制御によく使用されている駆動モータの運動状態分析から、モータ系に関する動作状態を判断する手法を研究の目的とする。方法としては、検出用センサを使わずに、モータ駆動系のモデルを利用することにより、間接的な手法でモータ駆動系の作業状態をモニタリングする方法を提案する。

本研究では、まず、モータ系を研究対象とし、モータ駆動系の入出力データにより、モータ系全体のパラメータ同定を行い、系全体のモデルを構築する。それにより、系とモデルとの出力誤差および負荷からの駆動反力あるいは外力を同定することにより、オンラインでモータ系の動作状態を分析・制御することを試みる。

2. 同定系の構成と同定方法

本研究で扱うDCサーボモータの速度制御系の構成を図1に示す。DCサーボモータの運動を支配している方程式をここでは式 (1) のようなものとする。

$$J \dot{\omega} + \lambda \omega + T_L \cdot \text{sgn}(\omega) = K_T I_a \dots (1)$$

ここに、 J は系全体の慣性モーメント、 λ は粘性減衰係数、 T_L はクーロン摩擦トルク、 ω は角速度、 $\dot{\omega}$ は角加速度、 K_T はトルク定数、 I_a はモータに流れる電流値である¹⁾。 $\text{sgn}(\omega)$ は符号関数であり、下式に従うものとする。

$$\text{sgn}(\omega) = 1 : \omega > 0, \text{sgn}(\omega) = -1 : \omega < 0 \dots$$

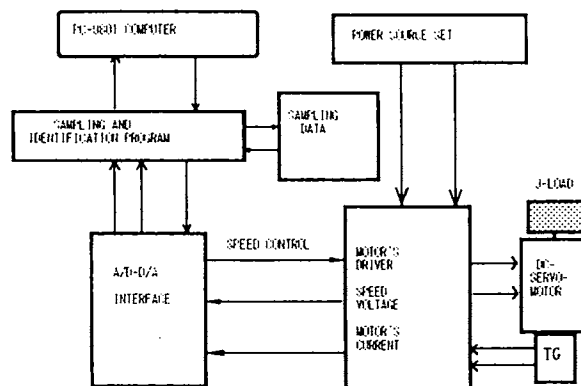


図1. DCサーボモータのパラメータ同定システム

同定方法としては逐次最小2乗法である。逐次最小2乗法はシステムが動作し始めてから逐次得られるデータを用いることにより、各時点においてそれまでに得られた推定値を更新していくパラメータの同定法である^{2,3)}

$$\begin{cases} \hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} - k_N (Z_N^T \hat{\theta}_{N-1} - y(N)) \\ \therefore k_N = P_{N-1} Z_N (1 + Z_N^T P_{N-1} Z_N)^{-1} \dots (3) \\ P_N = P_{N-1} - P_{N-1} Z_N (1 + Z_N^T P_{N-1} Z_N)^{-1} Z_N^T P_{N-1} \end{cases}$$

ここに、 $\hat{\theta}_N$ は第N時点でのパラメータ同定値であり、 $y(N)$ 、 Z_N は第N時点での入出力データの観測値である。

$\hat{\theta}_N : [\hat{J}_N, \hat{\lambda}_N, \hat{T}_{LN}]^T$ 固定するパラメータ

$y(N) : [I_{aN}]$ モータの電流値

$Z_N : [\dot{\omega}_N, \omega_N, \text{sgn}(\omega)_N]$ モータの状態量

2.1 パラメータ同定のための入力信号と同定精度との関係

通常、パラメータ値の同定はモータ駆動時の電流値、角速度及び角加速度値を用いての最小2乗法により簡単に求められるように思われるが、以上述べた方法を用いて、DCサーボモータ系のパラメータを同定した場合、同定するための入力信号の振幅値と周波数にパラメータの同定結果が依存してしまうことがわかった^{4,5)}。

図2の (a), (b) には $f=2\text{Hz}$ と $f=6\text{Hz}$ の入力信号を与えることにより得られたパラメータの同定結果を示す。両同定結果を比較すると、慣性モーメント J の同定値にその相違は見られないが、クーロン摩擦 T_L と粘性減衰係数 λ の値は、同定のための入力信号に強く依存し、大きく異なっている。

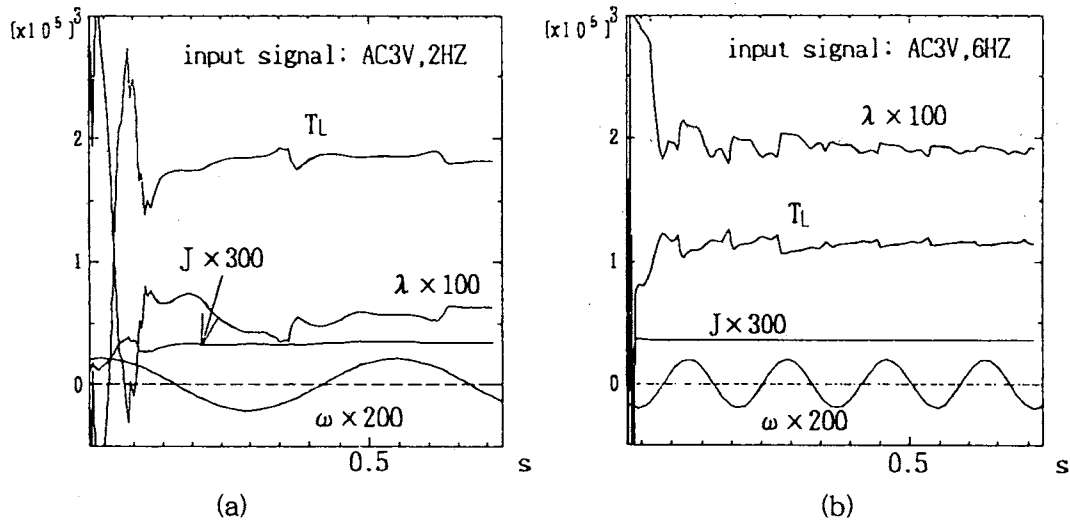


図2 パラメータの同定結果

一方、この程度の入力信号の変化に対して同定したパラメータ値がこんなに大きく変化することは考えられなく、また多くの試行に基づいた実験より系統性のある同定結果が得られないことから、同定のための入力信号に対してロータに働く粘性減衰力とクーロン摩擦力とがお互い同位相で変化するために、それらを分離して同定できないことがあることを見い出すことができた。

2.2 同定のための入力信号について

本研究では、同定のための入力信号によってはクーロン摩擦力と粘性減衰力とが同位相で変化するため、相互に影響を及ぼし合い、正しく同定できないことがあることを示してきた。これに対してクーロン摩擦力と粘性減衰力とが同位相で変化しない同定用の入力信号、即ち、モータ系に直流+交流の入力信号を与えることにより系のパラメータを同時に同定することが考えられる。直流信号のレベルとして交流信号の振幅値より大きく設定すれば、モータの回転方向は変化せずに回転速度が正弦信号に従い変化する。このとき、クーロン摩擦力と粘性減衰力とが同位相で変化することはなくなる⁶⁾。

図3 (a) (b) に入力信号として $\text{DC}3 + \text{AC}2\text{V}$ で、 $f=2\text{Hz}$ と $f=6\text{Hz}$ のときの同定結果を示す。図3 (a) (b) を比較すると、 $f=2\text{Hz}$ と $f=6\text{Hz}$ の入力信号で同定した結果はほとんど同じである。この

ように、直流+交流の入力信号でモータ系を同定すれば、その同定結果は同定のための入力信号に依存せずに真値に近い同定結果の得られることがわかった。

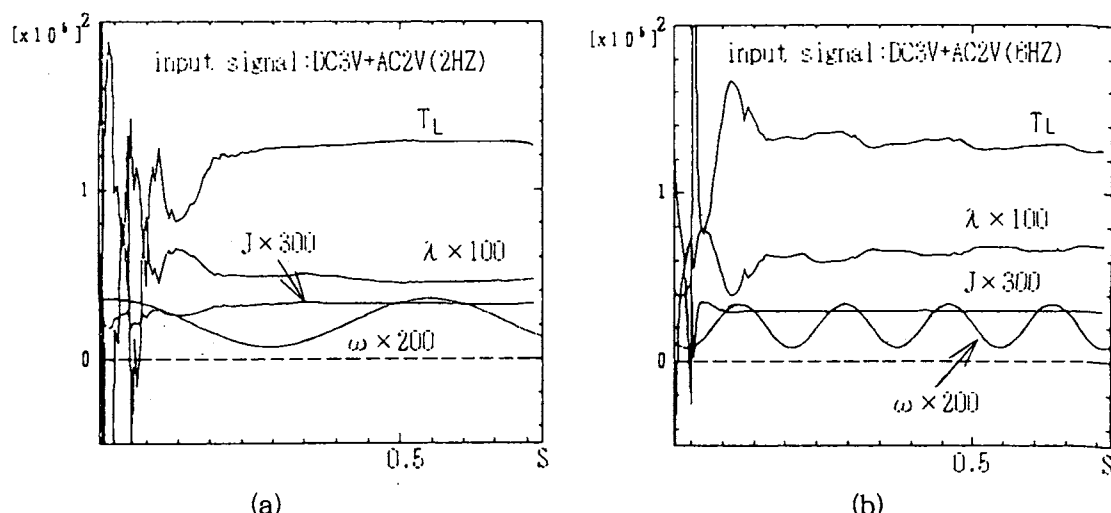


図3 直流+交流の入力信号で得られたパラメータの同定結果

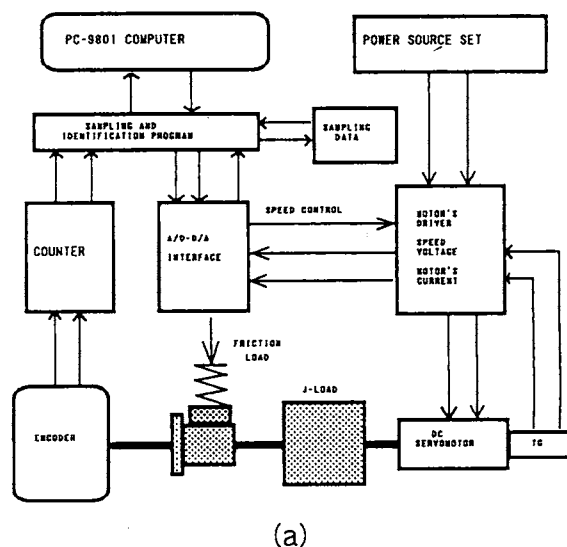
3. 誤差評価による数学モデルの高精度化に関する研究⁷⁾

モータ駆動系のモデルを利用することにより、間接的な手法でモータ駆動系の作業状態をモニタリングする場合、モータ駆動系のパラメータ値やその変化の様子をできるだけ精度良く同定することは本研究では重要な問題である。このとき、モータ駆動系の数学モデルが正確でなくてはならない。これに対して、ときにモータ駆動系のメカ構造部分の把握があいまいであったり、作業に応じて変化してしまう場合には当初考えていた数学モデルそのものが実際の系とは異なってしまい、正しい同定結果が得られないことになる。

本研究では、モータ駆動系のメカ構造部分の特性把握があいまいにしかとらえられなく、数学モデルが不正確な場合について、実際の系とあいまいな数学モデルにおける電流値との誤差を単純類似度を用いて評価することにより、モータ系の負荷状態を判断し、より正確度の高いメカ構造系の数学モデルを求めることを目的とする。

通常その最も基本的な数学モデルとして、式(1)に示すような数学モデルをまず最初に考えることができる。

式(1)の数学モデルに従い、図4 (a) に示すようなモータにより駆動されるメカ構造物のパラメータ (J , λ , T_L) 同定を行った。この結果を図4 (b) に示す。各パラメータはほぼ一定値に収束しており、ほぼ正しく同定されているように思われるが、念のために、これらパラメータ値の正確さを確認することを目的として、同定により得られたパラメータ値 (\hat{J} , $\hat{\lambda}$, \hat{T}_L) を下式 (4) に代入し、実際のモータ駆動トルク ($K_T I_a$) と数学モデルより得られる駆動トルク (\hat{J}



$\dot{\omega} + \hat{\lambda} \omega + \hat{T}_L \cdot \text{sgn}(\omega)$ との間の誤差 ε (K) を求めてみる。

$$\varepsilon(k) = k_r \cdot I_a - (\hat{J} \dot{\omega} + \hat{\lambda} \omega + \hat{T}_L \cdot \text{sgn}(\omega)) \quad \cdots(4)$$

系とモデルとの間の誤差 ε (K) が近似的に平均値=0の白色雑音になればほぼ正確に同定されたことになる。しかしながら、図5に示すように系とモデルの間には誤差 ε (K) があり、その値は決して小さいとはいえない結果となっている。誤差の原因としてはメカ構造物駆動系の数学モデルが不正確である場合、あるいは同定結果が不正確である場合の2つが考えられる。

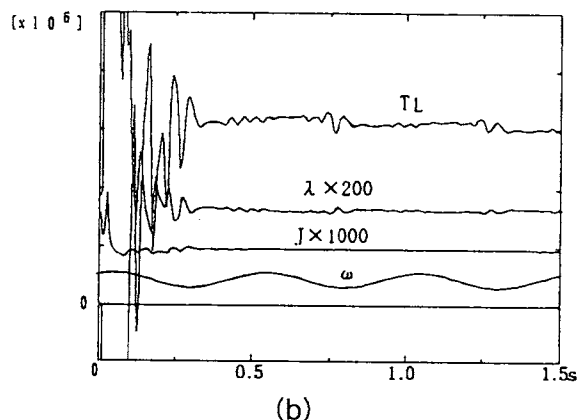


図4 同定系とパラメータの同定結果
(入力信号：DC+AC)

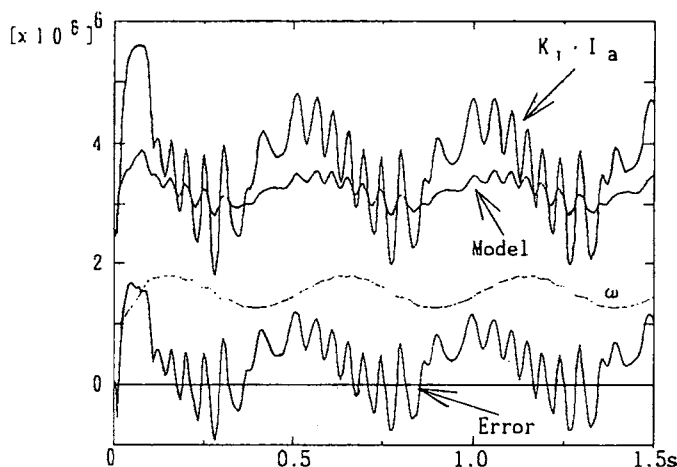


図5 モータ系とモデルとの間の誤差

本研究では下式(5)に示す単純類似度Sを用いることにより誤差の中に含まれる各要因を評価することを試みる。

$$S = \frac{(X \cdot C)}{\|X\| \cdot \|C\|} \quad \cdots(5)$$

ここにXが系とモデルとの間の誤差系列であり、Cがモータ軸の角加速度、角速度、角変位等の標準パターンとしての時系列である。Sの値は-1~1をとり、標準パターンCと最も近い誤差系列ほど1に近づく。すなわち、角加速度、角速度あるいは角変位等の標準パターン時系列と誤差系列との単純類似度をそれぞれ計算すれば、誤差系列がどの標準パターンと最も近いかを示してくれる。それにより、単純類似度による誤差系列の評価によりパラメータの同定誤差やモデルの変化要因をとらえられることがわかる。基本的な誤差の現れ方に基づいて、図5に示される系とモデルとの間の誤差が、同定結果の不正確さによるものか、あるいは数学モデルの不正確さによるものかを評価する。

ここで、まず、単純類似度による図5に示された誤差の評価結果を表1に示す。これより系とモデルとの間の誤差はモータ軸の角加速度と最も強い相関を示していることがわかる。これは、当初同定したときとは状態の変化がおり慣性モーメントJが変化したあるいは不正確であったことを示していることになる。

Table 1 Evaluated results of error by the similarity

Evaluated results by the similarity (1)		
Standard patterns	Certificate pattern	Error(ε) with the standard pattern's similarity
Angular acceleration	$\dot{\omega}$	0.9563
Angular velocity	ω	0.0936
sgn(ω)		0.0864
Rotary angular	θ	0.4781

慣性モーメントの増分 $\Delta \hat{J}$ は次式(6)により求まる。

$$\Delta \hat{J} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\varepsilon(K)}{\dot{\omega}(K)} \dots\dots\dots (6)$$

さらに、式(1)中の数学モデルに修正 ($\hat{J} \rightarrow \hat{J} + \Delta \hat{J}$) を加え、系とモデルとの間の誤差 $\varepsilon'(K)$ を求めてみる。このときの誤差系列 $\varepsilon'(K)$ を図6に示す。

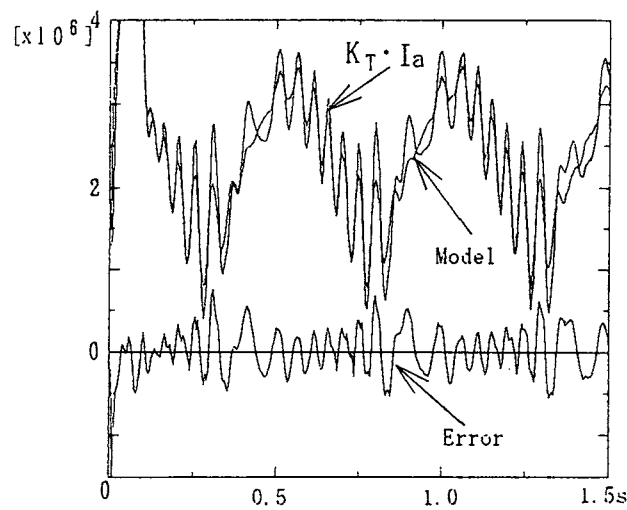


図6 モータ系と修正したモデルとの間の誤差

Table 2 Evaluated results of error by the similarity

Evaluated results by the similarity (2)		
Standard patterns	Certificate pattern	Error(ε) with the standard pattern's similarity
Angular acceleration	$\dot{\omega}$	0.0983
Angular velocity	ω	0.1255
sgn(ω)		0.1576
Rotary angular	θ	0.7889

図6の誤差はまだ大きい。このため修正された慣性モーメントを用いて、もう一度改めて単純類似度による評価を行ってみると、その結果として表2に示すように、モータ軸の角変位と強い相関をもっていることがわかる。

これはメカ構造物の回転中心が偏心していたりする場合に起こるものである。このモータ軸の角変位に影響される項は(7)式により求められる。

$$mgh = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\varepsilon'(k)}{\cos(\theta_k)} \dots \dots \dots (7)$$

この項は式(1)の数学モデルでは考慮していなかったものである。そして、図4 (a) のメカ構造物における数学モデルもより正確に

$$(\hat{J} + \Delta \hat{J})\omega + \hat{\lambda}\omega + \hat{T}_L \cdot \text{sgn}(\omega) + mgh \cdot \cos(\theta) = K_T \cdot I_a \dots \dots \dots (8)$$

であることがわかってくる。

それから式(8)に示すような修正された数学モデルを用いることにより、再び図4 (a) に示すメカ構造物系のパラメータ同定を行った。その結果を図7に示す。

図7 (a) には未知パラメータを4つとした場合の同定値をまた同図 (b) にはその結果を用いたときの系と数学モデルとの誤差を示す。

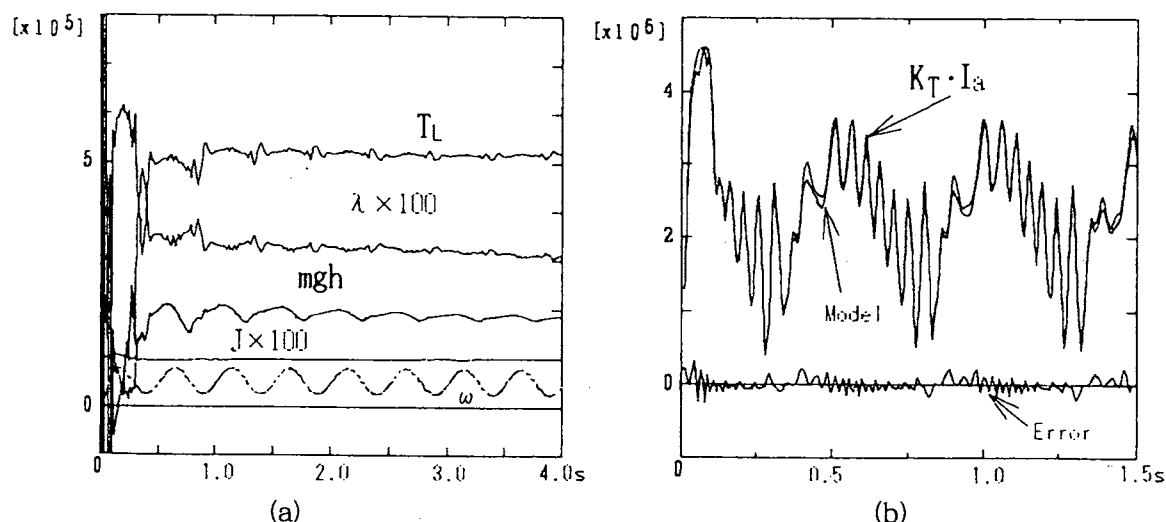


図7 同定結果と誤差

図7 (b) に示されるように誤差系列は小さく、パラメータ同定値およびその数学モデルはほぼ正しいと判断できる。

以上の研究を通じて、系とモデルとの間の誤差に対して、角加速度、角速度、角変位等を標準パターンとする単純類似度による評価を行えばその誤差要因を明らかにすることができ、より信頼性の高い数学モデルを得ることができる。

4. 応用

これより、本研究では、以上の研究で得られた高精度なモータ系の数学モデルを用いて、モータ駆動時に生じる負荷反力だけを同定することにより、生じる負荷反力を小さくするモータの駆動手法を考察し、こうした手法を用いたモータの制御系を提案する^{8,9)}。

4.1 外力成分の同定

図8 (a) に示すように、モータ駆動系に振動負荷を付けたときの負荷からの反力を式(9)を用いることにより同定することを考える。

$$J\omega + \lambda \omega + T_L \cdot \text{sgn}(\omega) + R_f = K_T I_a \cdots \cdots (9)$$

まず、ロータ駆動部分だけの駆動トルクについては、前節で求めたロータ系のパラメータ値 (\hat{J} , $\hat{\lambda}$, T_L) を式(9)の中で用いることとする。これより振動系負荷を付けたときのモータ駆動トルク ($K_T I_a$) からロータ駆動部分の駆動トルクを差し引くことにより負荷からの反力成分 R_f である外力を同定することとする。

この結果を図8 (b) に示す。同図中 R_f が示すように負荷からの反力成分が外力として同定されてくることになる。

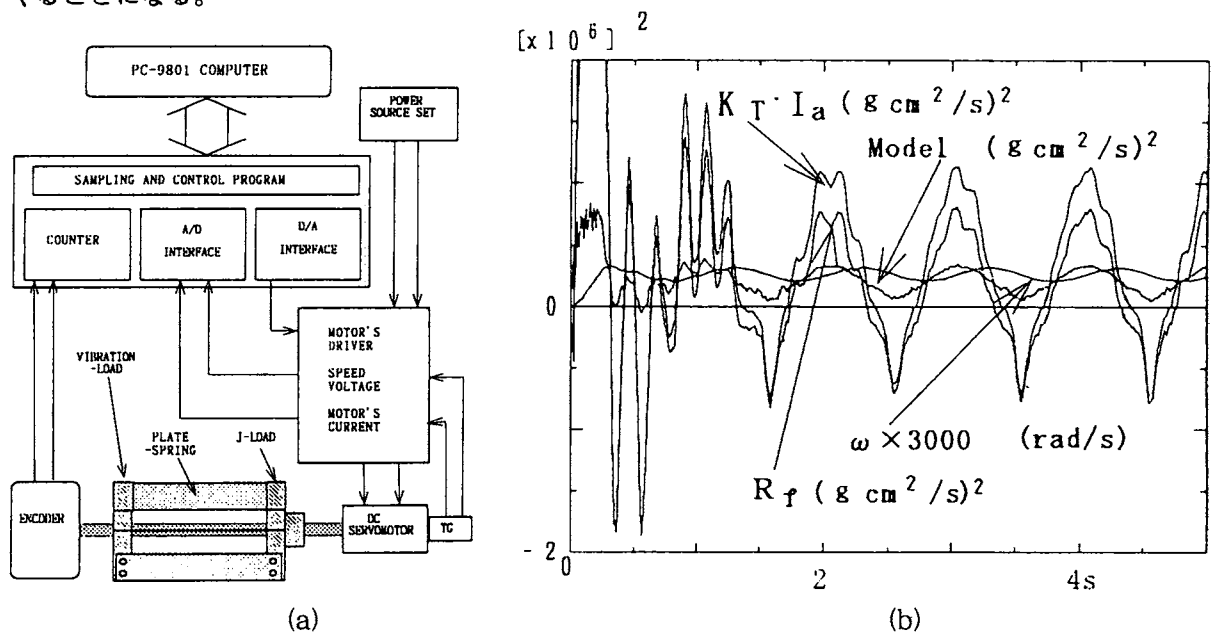


図8 負荷からの反力成分の同定結果

4.2 負荷系からの反力を利用したやさしい機械系の駆動

本研究では負荷系の急激な加速・減速をおさえたやさしい機械系の駆動を実現するために、同定された負荷系からの反力成分をモータへの入力指令値から差し引く駆動方法を考える。本研究で提案する制御系の概略を図9に示す。フィードバック係数 (β) の与え方によってどの程度同定値である外力成分を生かすかが決まる。フィードバック量 (β) の与え方は制御プログラム中でのソフトの問題であり、オンラインでどのような値を与えることも可能である。

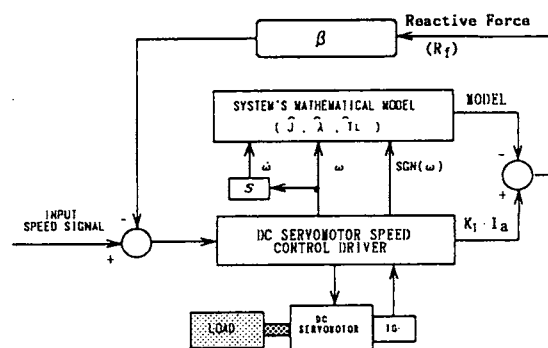


図9 モータ駆動系のフィードバックブロック線図

4.3 負荷系の運動特性の比較

同定された負荷系からの反力成分をフィードバックしたときの負荷系の運動と、反力成分をフィードバックしない場合における負荷系の運動とを比較することにより、負荷系からの反力成分をフィードバックすることの効果を図10と図11を用いて示す。図10は負荷系からの反力成分をフィードバックしない場合におけるモータ軸系の角速度と負荷系の角速度等を示している。

モータ軸と負荷系との間の相対角速度は図10 (a) (b) に表われているように、負荷系はかなり振動的になっていることがわかる。これに対して同様の実験を、負荷系からの反力成分をフィードバックした場合において行った。このときのモータ軸系の角速度と負荷系の角速度等の様子を図11に示す。

図11 (a) (b) はそれぞれ図10 (a) (b) に対応するものであり、モータ軸と負荷系との相対角速度にも表れているように負荷系の振動はかなり抑えられていることがわかる。

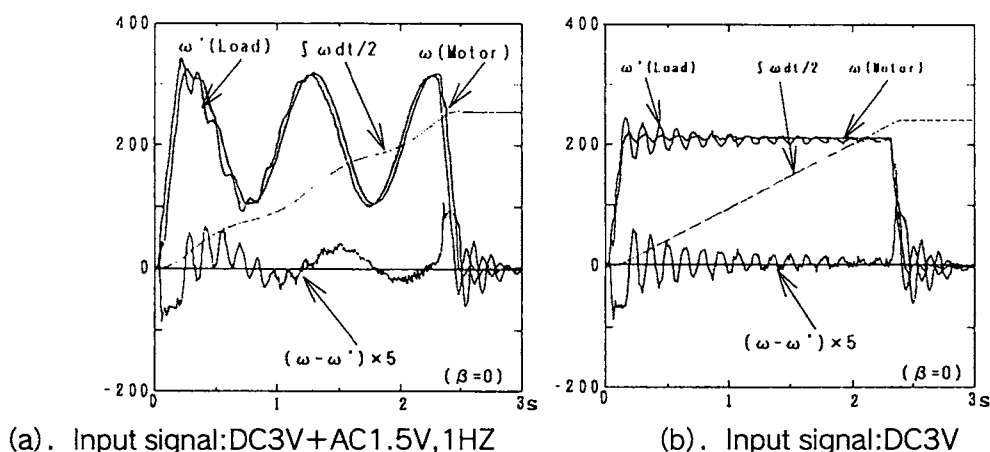


図10 負荷系からの反力成分をフィードバックしない場合の
モータ軸系の角速度と負荷系の角速度等

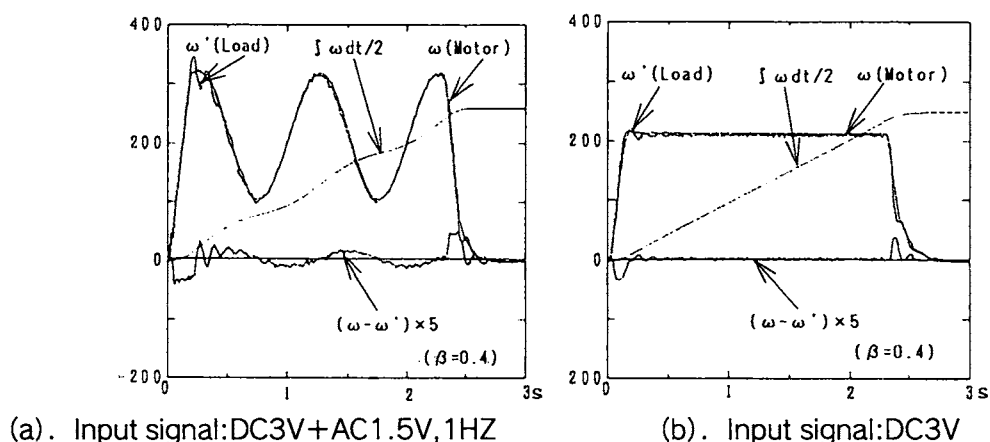


図11 負荷系からの反力成分をフィードバックした場合の
モータ軸系の角速度と負荷系の角速度等

図10 (b) と図11 (b) の実験におけるモータ電流の様子を図12に示す。負荷系からの反力成分をフィードバックしない場合には、負荷系からの反力成分を外乱とみなすため、モータ電流が振動的になっていることがわかる。モータ電流が振動的になっていることが負荷系の振動を減衰させる効果として作用するのではなく、むしろ外力からの反力成分をモータ軸の運動に与えるものであることがわかる。これに対して負荷からの反力成分をフィードバックすることによりモータ電流の振動もより早く減衰し、定常値に収束していることがわかる。また本研究で提案する手法では、モータ駆動系に作

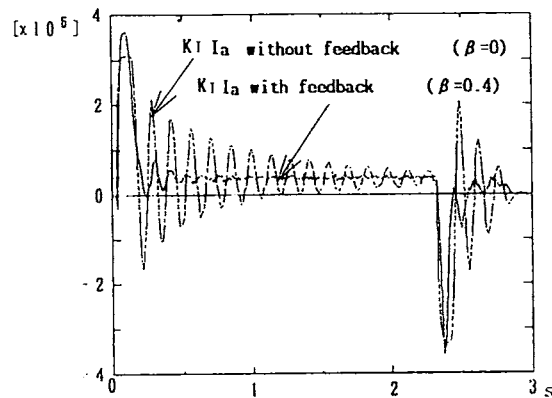


図12 負荷系からの反力成分をフィードバックしない場合とフィードバックした場合のモータ電流

用する外力成分の計測のためにセンサを負荷系に設ける必要がないと同時に、制御中にどの程度同定値である外力成分を生かすかはソフトウェアの問題であり、オンラインでどのような調整も可能となる。

5. 結 言

以上より、本研究で提案するモータ駆動系の動作状態分析方法は、モータ駆動系のパラメータ同定を用いて、より高精度なモータ駆動系の数学モデルを構築し、また系とモデルとの間の誤差から、モータ駆動時に生じる負荷からの反力を同定することにより、モータ駆動系の作業状態を判断する機能をもたせ、モータ駆動系の動作状態を分析・制御することが十分可能であることを示してきた。

本研究で提案した方法を用いて機械システムの動作状態分析・振動減衰・異常診断・故障判断等に应用した場合、モータ駆動系の作業状態分析に関連させることが容易になり、また実用性の高い技術になるであろう。

参考文献

1. 田 政ら：パラメータ同定のための入力信号と同定精度との関係，日本機械学会論文集63巻613号C編，(H9年9月)
2. 花岡 剛士ら：ブロックパルス関数を用いたDCサーブモータシステムのパラメータ推定方法，電学論D，113巻10号，PP.1138-1143 (H5年)。
3. 小林 康秀ら：構造未知な線形離散直系に対する同定入力の一決定法，計測自動制御学会論文集，Vol.30，No.8，PP.902/907 (1994)。
4. 相良 節夫ら：システム同定，計測自動制御学会，S62年。
5. 足立 修一：ユーザのためのシステム同定理論，計測自動制御学会，H5年。
6. 栗屋伊智朗ら：クーロン摩擦が作用する機械運動系のパラメータ同定法，日本機械学会論文集(C編)，59巻567号 (1993-11)。
7. 田 政ら：Study on Mathematical Model with High precision for Actual Systems
8. 田 政ら：負荷からの駆動反力を同定することによるやさしいモータ駆動系の実現／日本機械学会論文集投稿中
9. 日本機械学会：動設計のためのモデルリング 平成7年6月25日

学位論文審査結果の要旨

平成10年1月26日に開催された第1回学位論文審査委員会、及び同年2月4日に行われた口頭発表後の第2回学位論文審査委員会で審査した結果、以下のように判定した。

本研究の背景として海底油田開発における油井ドリル作業がある。油井ドリル作業は長いドリルにより、地中深く穴をあけていく作業であり、堅い岩盤あるいは軟らかい土質等の状況の変化に応じて切削条件を変化させることが必要であり、このためにはドリル作業状態の分析、及び同定が必要となってくる。

こうした背景を元に、本論文ではモータ駆動系のパラメータ同定に関する基礎的及び応用的研究を展開している。(1)同定に関する追試の結果、パラメータ同定のための入力信号によっては、モータ駆動系のパラメータを正しく同定できないことがあることを見い出している。モータ駆動系に働くクーロン摩擦力と粘性減衰力とが同位相で変化するような入力信号においては、クーロン摩擦力と粘性減衰係数とを区別して正しく同定できないことを示すと共に、それらを克服できる入力信号に関する提言を与えている。(2)次に、モータ駆動系における物理モデルの変化とパラメータの変化を捕らえる手法を提案している。物理モデルやパラメータの変化は推定残差に現れるため、この推定残差と駆動系のもつ状態量との間の相関を評価する手法の提案とその有効性を示している。(3)さらに、本研究で提案する同定手法の応用として、モータ駆動系に働く外乱力を同定し、同定された外乱力を駆動系へフィードバックするモータ駆動系を提案している。この手法は福祉面におけるメカトロニクス技術においては必須のものであり、今後の展開が期待されるものである。

以上の研究成果はパラメータ同定とその応用に関するものであり、学術的にも実用的にも寄与するところ大であり、本論文は博士（工学）に値するものと判断する。